

Magnetic Barkhausen Noise를 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 열화도 평가

이종민*, 안봉영**, 남영현**, 남승훈**, 이승석**, 이억섭***

Evaluation of 1Cr-1Mo-0.25V Steel Degradation Using Magnetic Barkhausen Noise

J. M. Lee, B. Y. Ahn, Y. H. Nam, S. H. Nahm, S. S. Lee and O. S. Lee

Key Words: 1Cr-1Mo-0.25V Steel(1Cr-1Mo-0.25V강), Domain wall(자벽), Degradation(열화) Coercive Force(보자력), Vickers Hardness(경도), Ferromagnetism(강자성)

Abstract

It is inevitable to evaluate the life of turbine rotor because the operating periods of power plants need to be extended. The magnetic methods utilizing Magnetic Barkhausen noise curve were applied to detect the degradation caused by thermal aging. The Magnetic property of material depends on the domain dynamics and it is affected by the microstructure of material. Therefore the magnetic property is very sensitive to the microstructure change of the material. It is, thus, very useful to detect the state of degradation of varying materials. The test specimen made of 1Cr-1Mo-0.25V steel was used widely for turbine rotor material, and seven kinds of specimens with different degradation levels were prepared by the isothermal heat treatment at 630°C. With the increase of degradation, BHN was decreased. The result was compared with coercive force and vickers hardness.

1. 서론

1Cr-1Mo-0.25V강은 국내 화력발전소의 터빈 로터에 많이 사용되고 있는 재료로서 시간이 경과함에 따라 열화(degradation)현상을 받게 된다. 따라서 플랜트의 안전성 또는 수명평가를 위하여 운용중인 설비재료의 강도, 인성에 대한 비파괴적 평가 방법이 요구되고 있다. 현재 비파괴 검출방법으로는 금속조직학,⁽¹⁾ 전기저항법,⁽²⁾ 경도법⁽³⁾ 등이 연구 발표된 바 있으며, 자기적 특성

을 이용한 방법으로는 Hysteresis loop 분석을 통한 bulk 자기특성 평가와 MPI (Magnetic Particle Inspection), MRI (Magnetic Resonance Imaging), MFL (Magnetic Flux Leakage), MBN (Magnetic Barkhausen Noise), MAE (Magnetic Acoustic Emission) 등을 적용하는 방법이 있다.⁽⁴⁻⁵⁾

재료의 자기적 특성은 원자내의 전자에 의한 것으로 전자의 오비탈 (orbital)운동과 스핀 (spin)운동에 의하여 자기모멘트(μ)를 갖게된다. 인가자장(H)에 대한 원자의 열진동은 상자성체가 약한 순자기모멘트를 갖게하며 이는 Curie-Weiss 법칙에 의한다. 한편 원자간 자기모멘트 상호 작용을 전제로 하는 분자장 (H_m) 이론에 의한 자발자화 (self-saturation), 전자-전자간의 스핀방

* 인하대학교 대학원

** 한국표준과학연구원

*** 인하대학교 기계공학부

향에 의한 에너지 교환력 (Exchange force) 및 자유전자의 중첩시 Pauli 원리에 의한 전자부껍질의 에너지준위 분리를 나타내는 밴드(band)이론 등은 강자성체의 특성을 설명하고 있다.

철강이나 Ni합금으로 대표되는 강자성체 재료는 자구 (domain) 및 이들간의 에너지 완충지역 역할을 하는 자벽 (domain wall)으로 구성되어 있으며 교환에너지와 결정 이방성에너지와의 상호작용을 통해 일정 두께의 자벽을 형성하게 된다. 이와 같은 자기적 구조를 갖는 재료에 외부 자기장을 가하게 되면 자벽이 점프 (jump)를 하는 자벽이동의 불연속성을 보이게 되며 이때 검출되는 노이즈 (noise)를 MBN라고 부른다. 이러한 자벽이동에 대한 장애물로는 개재물(inclusion)에 의한 요인과 전위 (dislocation) 및 소성 변형에 기인하는 미소이 있다.⁽⁶⁾ MBN법을 이용한 평가 방법은 강자성체에 주로 사용하고 있으며, 다른 자기적 방법에 비해 빠른 측정과 높은 감도, 효율적인 현장 적용이 가능하다는 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 MBN법을 이용하여 1Cr-1Mo-0.25V강의 열화도를 평가하였으며 기계적 물성치인 경도값 및 항복응력과 비교 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 준비

MBN 측정용 시험편은 길이 55 mm, 폭 5 mm, 두께 1 mm의 박판형 시편을 사용하였고, 기계적 물성과 화학적 성분은 각각 Table 1과 2에 나타내었다. 실제로 열화된 재료의 미세 조직과 유사한 미세 조직을 갖는 시료를 얻기 위해서 인위적으로 실제 사용온도 (583℃)보다 높고 재결정 온도보다 낮은 630℃에서 가속 열화처리를 하였고, 이때 소요되는 열화시간은 Fe의 자기확산 (self diffusion) 이론에 근거하였다.⁽⁷⁻⁸⁾ 실제 사용온도와 비교한 열처리 시간은 Table 3과 같다.

2.2 측정시스템 및 측정방법

Fig. 1은 MBN 측정을 위한 측정시스템의 개략도를 나타내고 있다. 측정시스템은 Ferrotest-Dur unit로서 electro magnet, hall probe sensor pick up coil, AC power supplier, amplifier 등으로 구성되어 있다. 측정조건으로 Average는 5회, Gain은 30, Filter는 int, Bandwidth는 2.0으로 설정하였으며 sensor에서 얻어진 값은 컴퓨터

Table 1 Mechanical properties

Temperature (°C)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area(%)	Hardness (Hv)
24	665.2	823.1	18.8	59.4	266
538	533.5	580.6	22.7	55.5	-

Table 2 Chemical composition(Wt,%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb
0.31	0.23	0.76	0.006	0.001	0.36	1.11	1.32	0.27	0.006	0.005	0.001

Table 3 Determination of aging at 630℃ for equivalent microstructure serviced at 583℃

Aging time at 630℃(hr)	453	933	1,322	1,822	3,640	5,460
Time served at 583℃(hr)	25,000	50,000	75,000	100,000	200,000	300,000

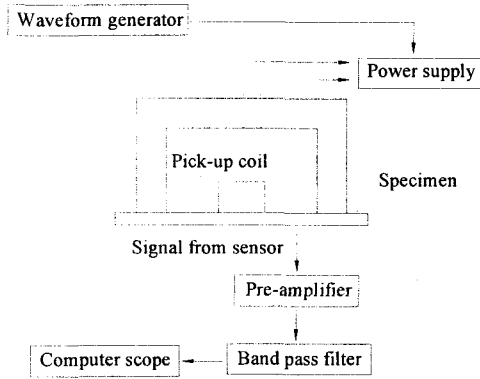


Fig. 1 Schematic diagram of experiment

에 의한 remote control에 의해 조정되었다. 시편에 가해지는 주파수는 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz로 하였으며 각각의 주파수에 대해 외부에서 가해주는 자기장 H_{max} 는 10 A/cm에서 시작하여 5 A/cm씩 증가시켜 60 A/cm까지 측정하였다.

MBN은 교류파형을 전원으로 증폭시킨 후, 자화 코일로 시편편을 자화시키는 과정에서 측정된다. 자화과정에서 시편편의 자속변화는 센서 내부의 검출코일을 통해 유도전압으로 검출되며 패러데이 법칙(Faraday's law)을 따르게 된다. Fig. 2에서는 실험에서 검출된 유도전압의 변화 형태를 개략적으로 나타낸 것으로 X축에는 외부에서 가해주는 자기장 H에 대한 tangential 값인 H_t 를, Y축에는 MBN를 나타내었다. 이때 Y축의 최대값에 해당하는 X축 값은 Magnetic barkhausen coercive force (BH_c)로 재료의 특성을 파악할 수 있는 하나의 인자가 될 수 있다.

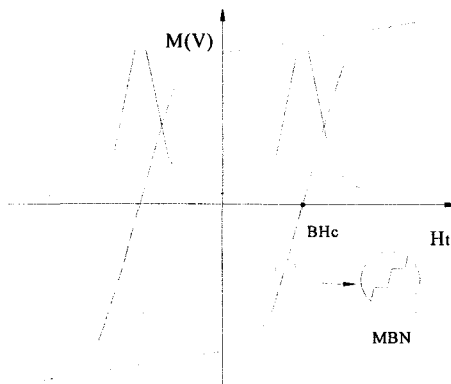
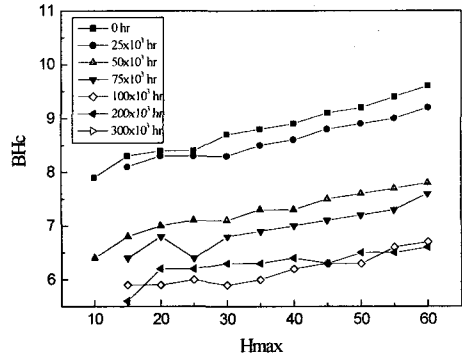


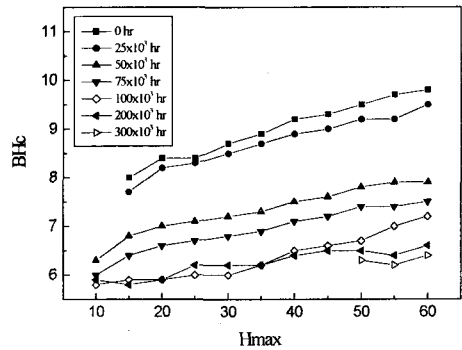
Fig. 2 Magnetic Barkhausen Coercive Force

3. 실험결과 및 고찰

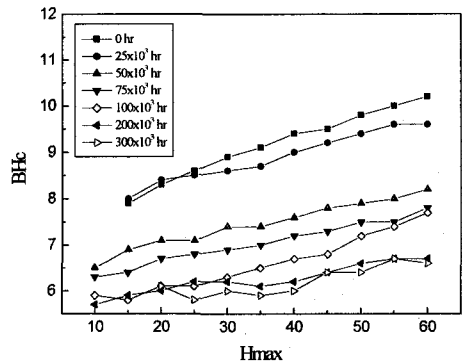
3.1 열화에 따른 Magnetic Barkhausen Coercive Force의 변화



(a) Frequency 30 Hz



(b) Frequency 40 Hz



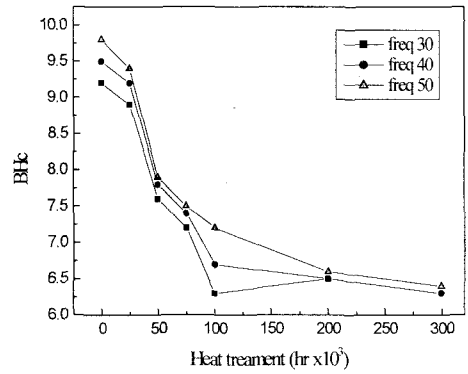
(c) Frequency 50 Hz

Fig. 3 The variation of BH_c with H_{max}

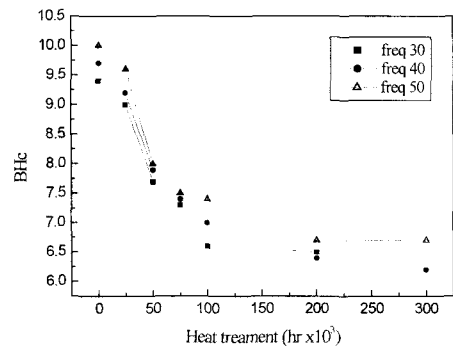
Fig. 3은 특정 주파수를 고정시키고 H_{max} 를 변화시켜 가면서 BH_c 를 측정하는 것이다. 그림(a), (b), (c)에 나타난 바와 같이 H_{max} 를 증가시킬수록 BH_c 는 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 열화가 많이 진행될수록 증가율은 점차 감소하며 불규칙한 구간도 증가하게 된다. 특히 300×10^3 hr 시편의 경우 주파수 30 Hz에서 거의 신호가 나타나지 않았으며, 주파수가 40 Hz, 50 Hz로 높아질수록 선형적인 상관관계를 얻을 수 있었다.

Fig. 4는 H_{max} 가 50 A/cm, 55 A/cm, 60 A/cm인 경우로 시편의 열화가 진행됨에 따라 열화 초기에는 BH_c 신호가 크게 감소되고 있으나, 100×10^3 시간 경과한 후에는 큰 변화를 관찰할 수 없었다. 이것은 열화에 따른 시편 내부의 조직변화를 의미하는 것으로 열화시간 증가에 따른 입계에서의 탄화물의 석출과 조직의 조대화, 불순물 원소의 입계편석에 의한 미세조직의 변화에 기인하는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 따라서 자기적 측면에서 볼 때, 열화가 진행됨에 따라 발생된 석출물과 불순물 등은 자벽이동의 장애물로 점프현상을 일으키는 원인이 되며, 그 발생정도는 열화 초기에 많이 나타나고 있었다.

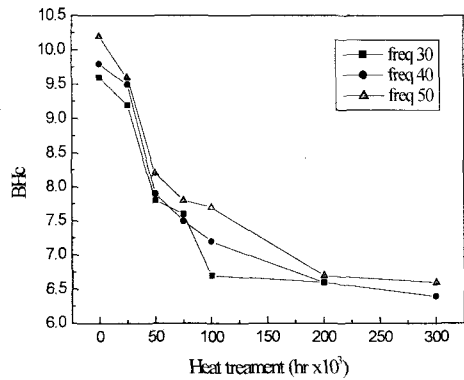
Fig. 5는 주파수 40 Hz, H_{max} 55 A/cm인 실험조건에서 얻은 BH_c 를 경도값(H_v)/보자력(Coercive force: H_c)과 비교한 것이다.보자력과 같이 열처리 시간이 증가함에 따라 경도값은 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 열화시간이 100×10^3 시간을 넘으면 감소율의 변화 폭이 점차 작아지는 경향을 보였다. 그러나보자력에 의한 H_c 값은 경도 측정치보다 감소의 폭이 상당히 크게 나타나고 있었다. 열화시간이 100×10^3 시간을 넘어서도 변화의 폭이 뚜렷이 나타나고 있어 장기간 사용된 설비의 열화도를 측정하는데 있어 우수한 방법으로 생각된다. 그러나,보자력에 의한 열화도 측정은 현장에 직접 적용하기에는 시간적, 공간적으로 많은 제약이 따른다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 더욱 실용적인 방법으로 MBN에 의한 BH_c 를 측정하였다. 이 방법은 센서를 대상체에 직접 접촉하여 시편의 자속 변화를 검출하므로 현장 적용성이 매우 우수하다. 또한, 고감도의 분해능은 열화가 많이 진행된 시편에 대해서도 뚜렷한 차이가 나타나며, 이것은 H_c 에 상당하는 분해능을 나타내고 있다.



(a) H_{max} 50 A/cm



(b) H_{max} 55 A/cm



(c) H_{max} 60 A/cm

Fig. 4 Dependence of Magnetic barkhausen coercive force on heat treatment

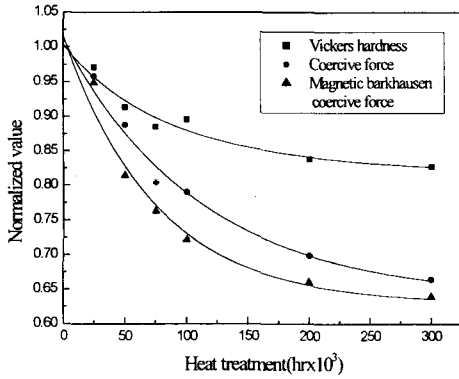


Fig. 5 Normalized values on heat treatment time

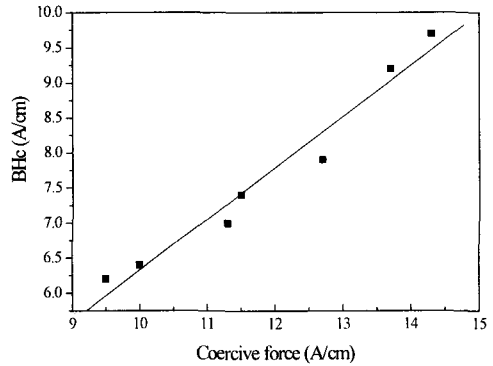


Fig. 6 The relation between BH_c and H_c

3.2 Magnetic barkhausen coercive force(BH_c)와 항복 응력과의 상관관계

Fig. 6은 BH_c와 보자력과의 상관관계를 나타낸 것으로, 보자력과 BH_c 사이의 두 인자간에는 좋은 선형관계를 보여주고 있다.

Fig.7은 BH_c와 경도값의 상관관계를 나타내고 있다. H_c와 경도값의 선형관계를 나타내는 연구⁽²⁾와 마찬가지로 BH_c도 경도값과 선형관계를 갖고 있음을 보여주고 있다. 따라서 재료의 경도값은 BH_c를 통해서도 추정할 수 있으리라 생각된다.

Fig. 8은 항복강도와 BH_c의 상관관계를 나타낸 것으로, 항복강도의 변화에 따른 BH_c의 변화량은 점차 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 따라서 MBN을 이용한 방법은 재료의 열화도 평가와 더불어 재료의 기계적 성질 측정에도 적용할 수 있을것이라 생각된다.

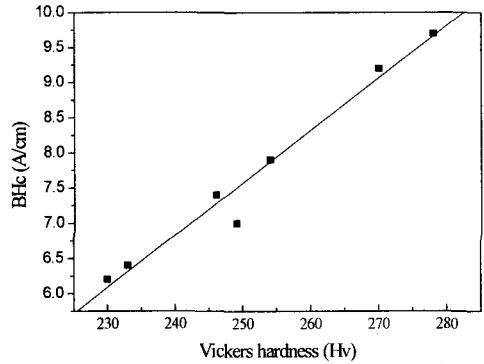


Fig. 7 The relation between BH_c and H_v

4. 결론

재료의 자기적 성질을 이용하여 1Cr-1Mo-0.25V 강의 기계적 성질(경도값, 항복강도)을 평가하는 비파괴법을 연구하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) Magnetic barkhausen coercive force (BH_c)는 경도와 보자력을 이용한 열화도 평가법보다 그 변화 폭이 크기 때문에 장시간 시효 열화된 재료의 열화도를 평가하는데 유용한 방법이다.

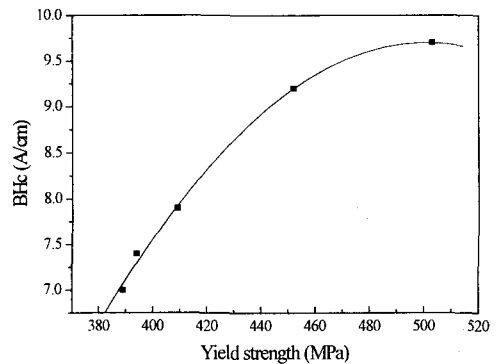


Fig. 8 The relationship between Yield strength and Magnetic barkhausen coercive force

- (2) 열화시간이 증가함에 따라 Magnetic barkhausen coercive force는 발생 정도는 탄화물 석출, 조직의 조대화, 불순물 원소의 입계편석때문에 발생정도는 점차 감소하였다.

참고문헌

- (1) B. W. Jones, C. R. Hills and D. H. Polins, 1991, Metallurgical Trans. A, Vol. 22A, pp. 1049-1508
- (2) 남승훈, 김엄기, 유광민, 1998, 전기비저항을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 인성열화의 비파괴 평가, 대한기계학회논문집 A권, 제 22권, 제 5호, pp. 814-820
- (3) B. J. Cane, P. F. Aplin and J. M. Brear, 1985, J. Press. Vessel Tech., Vol. 107, No. 6, pp. 295-300
- (4) Kumar S., Avrin W.F., and Whitecotton B. R., 1996, IEEE Trans Magn, 32, 5216
- (5) Mandayam S., Udpa L., S. S., and Lord W., 1997, NDT & E International, 30, 297
- (6) Cullity, 1993, Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley & Sons Inc
- (7) Abdel-Latif, A. M., Corbett, J. M., Siedy, D. and Taplin, D. M. R., 1981, Effect of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2.25 Cr-1Mo Steel, Fifth Canadian Conference on Fracture, pp. 1620-1631
- (8) 윤기봉, 윤석호, 김승태, 서창민, 남승훈, 1994, 시효열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온에서의 J_{IC} 및 T_{mat} 의 평가, 대한기계학회논문집, 제 18권, 제 11호, pp. 2860-2870
- (9) 유권상, 남승훈, 김용일, 유광민, 손대락, 1999, 보자력을 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강 인공시효재의 열화도 평가, 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 4, pp. 288-292